Radioatividade Natural na Exploração e Produção de Óleo e Gás Não Convencional

Joyce Castro de Menezes Duarte
Gustavo Filemon Costa Lima
Vinícius Gonçalves Ferreira
Jussara da Silva Diniz Lima

Atena Editora
Ano 2021

Radioatividade natural na exploração e produção de óleo e gás não convencional

Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os autores
Autores: Joyce Castro de Menezes Duarte
Gustavo Filemon Costa Lima
Vinícius Gonçalves Ferreira
Jussara da Silva Diniz Lima

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R129 Radioatividade natural na exploração e produção de óleo e gás não convencional / Joyce Castro de Menezes Duarte, Gustavo Filemon Costa Lima, Vinícius Gonçalves Ferreira, et al. - PR: Atena, 2021.

Outra autora
Jussara da Silva Diniz Lima

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5983-269-9
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.699210207

1. Radioatividade. 2. Materiais radioativos de ocorrência natural. 3. NORM. 4. Hidrocarbonetos não convencionais. I. Duarte, Joyce Castro de Menezes. II. Lima, Gustavo Filemon Costa. III. Ferreira, Vinícius Gonçalves. IV. Título.

CDD 539.75

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

Ano 2021

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

Ano 2021

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access, desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce,* ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

APRESENTAÇÃO

Os cadernos temáticos são umas das principais entregas do Projeto GASBRAS Seção Minas Gerais. O Projeto é uma rede P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) de gás não convencional no Brasil, constituída por instituições federais, estaduais e não governamentais de todo país, como a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Universidade Federal da Bahia (UFBA), Universidade Federal do Pará (UFPA), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) Universidade de São paulo (USP), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IG-UFRGS) e Pontífica Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS) amparado financeiramente pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

O intuído da série de Cadernos Temáticos é disponibilizar ao meio acadêmico e a sociedade, estudos relevantes sobre o gás não convencional no Brasil. Cada caderno abordará os principais conceitos e informações do contexto ambiental e socioeconômico no desenvolvimento da indústria do gás não convencional nas bacias sedimentares brasileiras direcionadas ao tema específico.

Dentro do projeto, o núcleo GASBRAS Seção Minas Gerais, formou-se com o foco em estudos sobre avaliação ambiental, regulação e mercado, articulação socioambiental e comunicação, correlata ao gás não convencional no Brasil. A equipe GASBRAS Seção Minas Gerais é composta pela UFMG, pelo CDTN e pela Associação Instituto Internacional de Ecologia e Gerenciamento Ambiental (AIIEGA) de São Paulo. Como instituições parceiras a equipe conta com a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e a Universidad Nacional del Comahue (UNCo – Argentina). Os coexecutores dessa equipe definiram uma área de investigação e monitoramento dentro do contexto da Bacia do São Francisco em Minas Gerais.

Os Cadernos Temáticos conciliam informações técnicas com uma abordagem didática e ilustrativa para tratar assuntos relevantes no contexto da pesquisa, difundindo o conhecimento perante a comunidade acadêmica e a sociedade leiga. O principal intuito destes cadernos é estimular a participação das comunidades no debate sobre a exploração de hidrocarbonetos não convencionais no Brasil.

Os Cadernos Temáticos, portanto, trazem diversas ramificações dentro de toda a pesquisa desenvolvida no Projeto GASBRAS Seção MG. Alunos, professores e pesquisadores, junto com universidades e institutos de pesquisas, transferem todo o conhecimento adquirido ao longo de anos, em páginas de textos ilustrados, a fim de gerar o interesse e o envolvimento do público alvo no mundo ambiental, geológico e químico em sistemas não convencionais para geração de energia.

Este caderno que possui como o tema "*Radioatividade Natural na exploração e produção de óleo e gás não convencional"* apresenta definições e conceitos técnicos sobre a radioatividade natural e seus diversos caminhos. Aponta conceitos químicos importantes para o entendimento de como a radioatividade atua em todos os ambientes e em especial na exploração de hidrocarbonetos não convencionais, que é o foco principal do projeto.

SUMÁRIO

RESUMO

Todos os processos de exploração e produção de óleo e gás, sendo este convencional ou não convencional traz como consequências alterações positivas e negativas em aspectos geológicos, ambientais e socioeconômicos da região explorada. Um dos impactos atrelados à esses processos é a liberação de Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM), presentes naturalmente nas rochas geradoras e reservatórios de hidrocarbonetos. Este risco é ainda mais evidente na exploração de reservas não convencionais devido ao uso da técnica de fraturamento hidráulico, que ao fraturar as rochas pode liberar os NORM ao meio externo, podendo causar contaminação radioativa de águas, equipamentos dos poços e chegar até os trabalhadores. A presença e o impacto desses materiais radioativos é ainda pouco discutido no setor acadêmico e energético mundial, por isso faz-se importante conhecer os princípios que norteiam esse problema de cunho ambiental, e que trazem a tona temas como a radiação e radioatividade, conceitos ainda hoje temidos pela população.

O projeto GASBRAS seção MG desenvolve esse caderno com o principal objetivo de esclarecer conceitos como a estrutura química dos átomos, isótopos, tipos de radiação, a radioatividade natural, NORM e sua presença em diversos setores industriais, assim como seus impactos no meio ambiente, na saúde, e sobre regulações; transmitindo à sociedade informações relevantes dentro do contexto do setor de exploração e produção de óleo e gás não convencional. Estes conceitos são fundamentais para compreender o por que, como e quando os impactos atrelados aos NORM ocorrem, e quais as condições ideais para o desenvolvimento de medidas mitigadoras nesse setor. Além disso é importante salientar a necessidade de uma divulgação efetiva dessas informações a fim de que a sociedade tenha consciência dos assuntos atrelados e possam participar ativamente do desenvolvimento de políticas energéticas de exploração de hidrocarbonetos mais sustentáveis a nível mundial.

1l INTRODUÇÃO

A preocupação com a radioatividade natural é observada tanto na exploração de hidrocarbonetos convencional como na não convencional. No entanto, devido a fatores técnicos, na modalidade não convencional existe uma maior inquietação em relação a radioatividade natural. Durante a exploração de hidrocarbonetos não convencionais por meio de técnicas específicas como o fraturamento hidráulico, pode ocorrer a liberação de radiosótopos primordiais presentes nas rochas fraturadas ao ambiente externo. Este processo traz à tona inúmeras questões, debates e pesquisas sobre a contaminação que pode ser gerada ao meio ambiente pela liberação dos Materiais Radioativos de Ocorrência Natural, os chamados NORM, que são radioisótopos naturais de elementos químicos. A presença desses materiais no meio ambiente e no setor industrial, coloca em evidência o assunto "*Radioatividade"* muitas vezes mal interpretado pela sociedade.

Conforme descrito no *Handbook of Radioactivity Analysis* (L'Annunziata, 2012), radioatividade é a emissão de radiação originada por uma reação nuclear ou como resultado de um decaimento espontâneo de um núcleo atômico instável. Núcleos de átomos instáveis, ao buscar a estabilidade, emitem radiação na forma de partículas e de energia, como as partículas alfa e beta e a radiação gama.

A radioatividade natural é aquela advinda de radionuclídeos distribuídos em toda a crosta terrestre ou dos radionuclídeos produzidos pelas interações de raios cósmicos com a atmosfera.

Apesar do termo "Radioatividade" ainda ser visto como um tabu na sociedade, por desconhecimento ou por causar medo, ela está presente em todo o universo, e mais próxima do que imaginamos. Dentro do corpo humano, nos alimentos, a própria radiação solar, nos minerais presentes na rocha, solo, cimento e consequentemente nas casas e construções.

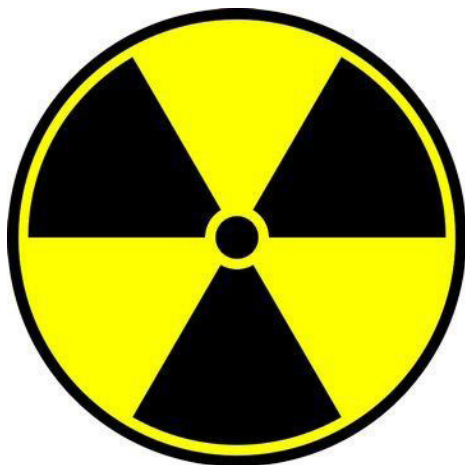
A radioatividade natural está presente nestes ambientes através das séries radioativas naturais de decaimento dos radionuclídeos mais abundantes na natureza: a série do Urânio (que se inicia com o urânio-238), do Actínio (que se incia com o urânio-235), do Tório- 232 e também do Potássio-40, este último em menor porcentagem. Estes isótopos dão origem a outros radioisótopos como o Rádio-226, Rádio-228 e Radônio-222, que são importantes quando se trata de proteção radiológica e no contexto da produção do gás não convencional.

Pela presença desses materiais em solos, rochas e minerais da crosta terrestre os mesmos podem sofrer interferências em suas concentrações a partir de atividades humanas, como a mineração e exploração de petróleo e gás. Nestas atividades, os radionuclídeos podem ser expelidos para fora do seu ambiente natural e proporcionar contato com os seres humanos, principalmente trabalhadores dessas atividades industriais.

Dentro da exploração de hidrocarbonetos não convencionais o incremento na concentração superficial do NORM está diretamente ligada ao uso do *fracking,* técnica que fratura rochas profundas para a liberação do óleo ou gás, e consequentemente pode liberar radionuclídeos ao ambiente. Portanto, faz-se importante estudar esses radionuclídeos a fim de se entender sua geração e seus impactos no ambiente e na saúde humana.

Os NORM estão presentes em baixas concentrações em toda a crosta terrestre,

no entanto, com o constante aumento na demanda por recursos energéticos, ocorrerá um aumento na exploração de petróleo e gás natural, e por consequinte aumentará a chance de que estes radioisótopos antes dispersos nas rochas do subsolo estejam cada vez mais presentes e concentrados no ambiente externo e em contato com os seres humanos.

Levando em consideração a importância desses conceitos associadas ao objetivo geral da Rede GASBRAS de pesquisa e desenvolvimento em recursos não convencionais, faz-se importante levar à sociedade esclarecimentos técnicos sobre a radioatividade, sua atuação, benefícios e impactos em nível nacional, daí a razão da produção desse caderno temático.

2I FUNDAMENTOS QUÍMICOS

Antes de aprofundar sobre a Radioatividade Natural, é preciso relembrar alguns princípios básicos da Química para um melhor entendimento sobre o assunto.

2.1 Átomos

Tudo se inicia na compreensão do átomo, estes são a base da construção de toda a matéria ao redor do universo, de elementos essenciais como hidrogênio, carbono e oxigênio.

Os átomos são constituídos por um núcleo carregado de prótons (partículas com carga elétrica positiva) e de nêutrons (partículas sem carga), e cercado por uma nuvem de elétrons carregados negativamente. Os elementos químicos são, portanto, determinados pelo número de prótons dos seus átomos (ex: Hidrogênio é formado por um átomo com 1 próton, e o Urânio com 92 prótons).

Existem os chamados isótopos, átomos com mesmo número de prótons e diferente número de nêutrons (ex.: Urânio-235 e Urânio-238 são isótopos que diferem entre si no número de nêutrons em seu núcleo). Os isótopos são muito conhecidos quando se fala em radiação e na área nuclear pois alguns deles são importantes elementos radioativos da natureza.

Isótopos: átomos com mesmo número de prótons e diferentes números de nêutrons.

A figura 1 mostra um exemplo do Hidrogênio e os seus três isótopos.

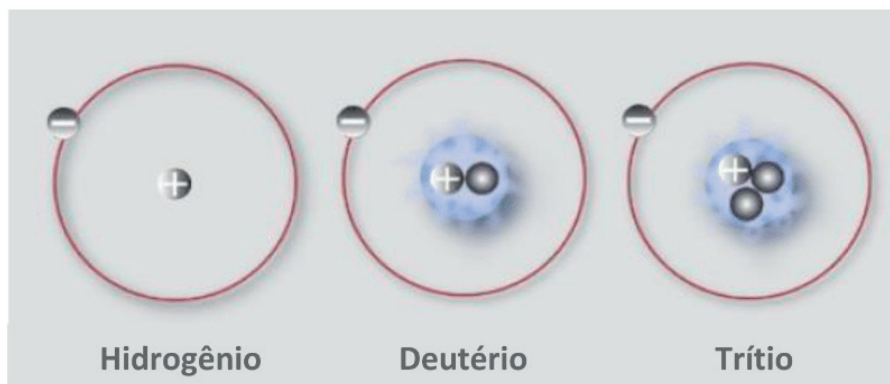



Figura 1 – Isótopos do Hidrogênio (Núcleo formado por prótons e nêutrons)

Fonte: Modificada de IAEA, 2004. p. 4

Prótons e nêutrons possuem a mesma massa e são mais pesados que o elétron, portanto estes definem a massa do átomo que está concentrado em seu núcleo; e é o que se chama de número de massa (IAEA 2004).

Como o número de prótons é único para cada elemento, pode-se caracterizar cada

isótopo pelo seu nome e seu número de massa, chamando-o de nuclídeo. O carbono 12 por exemplo (^{12}C) é um nuclídeo com 6 prótons e 6 nêutrons, já o carbono 13 (^{13}C) possui 1 nêutron a mais, e por isso sua massa é maior (IAEA 2004). Assim podem ser classificados então todos os elementos químicos e seu isótopos presentes na natureza.

2.2 Radiação

A radiação foi descoberta em 1895 pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen, à qual ele deu o nome de raios X, e que hoje é amplamente utilizado na medicina para identificar e analisar doenças. Alguns anos depois, o cientista francês Henri Becquerel descobriu o efeito da radioatividade ao perceber a ação de minerais de Urânio em alguns filmes fotográficos. Hoje a unidade de medida da radioatividade é denominada de Becquerel (Bq) em sua homenagem. Em 1898 o casal Pierre Curie e Marie Currie descobriram outros elementos químicos radioativos como o Polônio e o Rádio. Marie Curie ganhou a partir destas pesquisas, 2 prêmios Nobel, em 1903 e 1911 (UNEP 2016).

Radiação: Energia liberada de uma fonte que pode ser capaz de penetrar em certos materiais.

Radioatividade: Capacidade de um núcleo atômico em emitir radiação (energia) de forma espontânea.

A maior fonte de exposição à radiação ocorre por meios naturais, mas existem também as fontes artificiais, que são aquelas produzidas pelo homem, o seu maior exemplo pode ser através da utilização de equipamentos e fontes radioativas na medicina, além da radiação gerada nas centrais nucleares, e no ciclo de combustíveis nucleares. Inclusive na produção de óleo e gás são usadas fontes radioativas para a perfilarem de poços de petróleo (TAUHATA et al. 2014).

A radiação pode ser do tipo ionizante e não ionizante: a ***radiação ionizante*** tem energia suficiente para liberar elétrons de um átomo deixando assim o átomo carregado, e portanto pode causar efeitos nocivos em humanos e materiais; já a ***radiação não ionizante*** como, por exemplo, ondas de rádio, luz visível, ou radiação ultravioleta, não tem energia suficiente para arrancar os elétrons (UNEP 2016). A radiação abordada nesta publicação é a ionizante.

A presença ou a liberação de materiais radioativos no meio ambiente acaba por expor a população à radiação ionizante, o que aumenta o risco de efeitos danosos à saúde. Estes materiais liberados estão normalmente presentes em efluentes líquidos, gasosos, ou rejeitos sólidos, que são dispersos no ambiente quase sempre de forma acidental (TAUHATA *et al.* 2014).

Os elementos radioativos podem emitir radiação do tipo alfa, beta, gama, nêutron ou raio-X (IAEA, 2004).

- *Radiação alfa (α)*: é a emissão de dois prótons e dois nêutrons (um núcleo de Hélio), tem um curto alcance no ar (1 a 2 cm) e pode ser absorvida completamente por uma folha de papel ou pela epiderme.

- *Radiação beta (β):* emissão de elétrons por um núcleo instável, são partículas com energia elétrica inferior à das partículas alfa, e por isso podem penetrar ainda mais em materiais e tecidos.

- *Radiação gama (γ):* emissão de um fóton (sem massa) de altíssima energia na forma de ondas eletromagnéticas. É a radiação mais penetrante, e causa ionização nos átomos quando passa através da matéria, principalmente devido às interações com os elétrons.

- *Raio- X:* Energia na forma de ondas eletromagnéticas como fótons e são produzidos pela rápida desaceleração de um feixe de elétrons.

- *Radiação de Nêutrons:* emissão de nêutrons de um núcleo instável, ocorre durante a fissão atômica ou a fusão nuclear. São geralmente produzidos artificialmente, e altamente penetrantes. Quando interagem com a matéria podem causar a emissão da radiação beta e gama ou romper ligações químicas, danificando as células do organismo.

A Figura 2 exemplifica os tipos de radiação e o poder de penetração de cada uma delas.

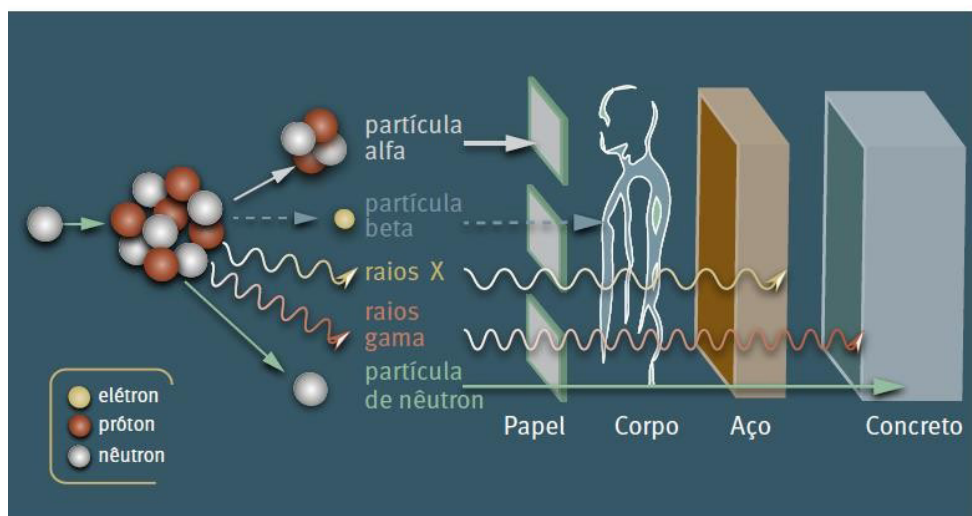



Figura 2 – Poder de penetração dos tipos de radiação

Fonte: UNEP, 2016. pg.9

A energia dos vários tipos de radiação é expressa em unidades de eletronvolt (eV), onde 1 eV é a energia transmitida a um elétron pela diferença de potencial de 1 V. Esta unidade é mais usualmente encontrada com seu múltiplo de 10^3, ou kilo-eletronvolt, equivalente a mil eletronvolt.

Quando se fala de efeito biológico, a unidade quantitativa responsável é o joule por

quilograma (J kg-1), conhecida como Sievert (Sv). O Sievert (Sv), é então a unidade para medição da Dose Equivalente, geralmente medida em MiliSievert ou MicroSievert (1Sv = 1.000 mSv) e (1 mSv = 1000 µSv). As doses são freqüentemente expressas por unidade de tempo tais como por hora (Sv/hr) ou por ano (Sv/a) (IOGP 2016).

De uma forma geral, existem duas grandes fontes de radiação: a "Radiação de fundo natural", muito conhecida no inglês como *Background*, e as fontes artificiais de radiação. A radiação natural de fundo inclui a radiação produzida pelo sol, raios cósmicos, radioisótopos primordiais ou explosões de supernovas, radiação terrestre (fontes que estão no solo, na água e na vegetação) e a radiação interna (presente no interior do corpo humano desde o nascimento do indivíduo, e tendo como fontes o Potássio-40 radioativo e outros isótopos).

Já as fontes artificiais incluem usos médicos de radiação, resíduos de testes nucleares, e usos industriais de radiação, entre outros.

Background (radiação de fundo): O acúmulo de materiais radioativos de fontes naturais no ambiente.

2.3 Radionuclídeos

Os isótopos de elementos químicos mais comuns são estáveis, essa estabilidade é determinada pelo equilíbrio entre o número de nêutrons e prótons presentes no seu núcleo. Átomos menores, possuem uma maior estabilidade, já núcleos atômicos com uma massa atômica elevada (ou seja, com muitos prótons amontoados em um pequeno volume) acabam ocasionando uma instabilidade no núcleo. Com isso é esperado que essa energia seja liberada, na busca por estabilidade. Contudo, a energia liberada é tão grande que o núcleo se fragmenta em duas partes. Esse processo é chamado desintegração nuclear, ou fissão (IAEA 2004), e também resulta na emissão de radiações. Os nuclídeos que emitem radiação ionizante são chamados radioativos, e quando um ou mais isótopos de um elemento é radioativo, estes são chamados radioisótopos ou radionuclídeos (HEALTH CANADÁ 2011).

Radionuclídeos: Nuclídeos que liberam energia pela emissão espontânea de radiação.

Todos os Radionuclídeos são, portanto, instáveis e sofreram transformações pela liberação de algum tipo de radiação na forma de partículas e/ou energia. Um radionuclídeo instável como o Urânio-238 por exemplo (92 prótons e 146 nêutrons), tende geralmente a se estabilizar pela liberação de dois prótons e dois nêutrons, ou seja, emissão de uma radiação alfa. Com essa liberação, o elemento se torna o isótopo Tório-234 (90 prótons e 144 nêutrons).

No entanto, esse radionuclídeo formado também é instável e tende a emitir radiação

(neste caso radiação beta) gerando outro radionuclídeo, o Protactínio-234, e assim sucessivamente com muitas sequências de transformações até que se forme um isótopo estável (Chumbo-206 para esta série) finalizando a série de decaimento do elemento pai, o Urânio-238.

A esses processos de transformação de radionuclídeos por emissão de radiação dá-se o nome de *Decaimento Radioativo.*

A Figura 3 descreve a série de decaimento do Urânio-238. Todos os radionuclídeos são instáveis, mas quando se fala de radioatividade natural, os mais importantes do ponto de vista dosimétrico são o Urânio-238, o Tório-232 e o Potássio-40.

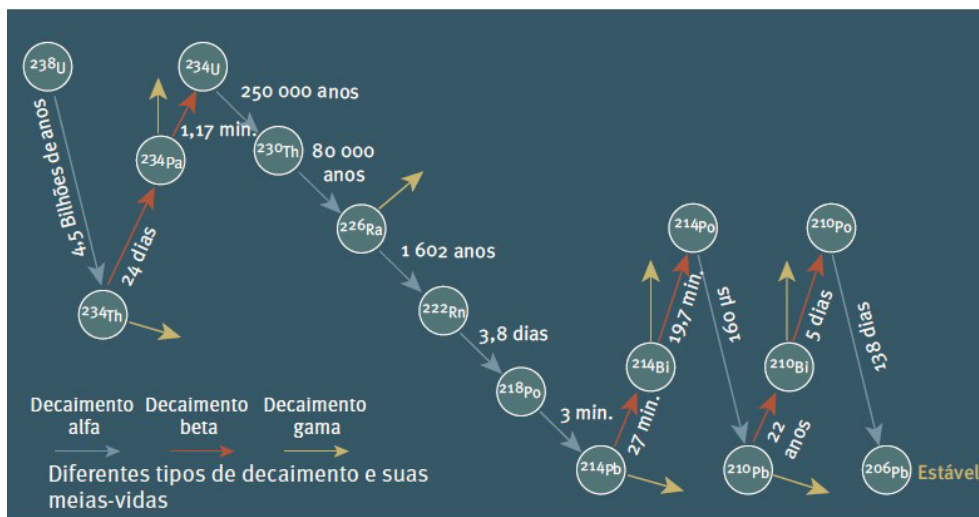



Figura 3 – Série de decaimento radioativo do Urânio-238

Fonte: UNEP, 2016, pg. 6

As setas ilustradas na Fig.3 estão acompanhadas de valores numéricos em anos, dias, minutos e segundos, que descrevem a *meia-vida* de cada radionuclídeo.

Tempo de meia-vida: é o tempo necessário para que a atividade de um radionuclídeo caia pela metade.

Tendo o exemplo da série descrita na figura 3, são necessários 4,5 bilhões de anos para que o Urânio-238, perca metade da sua atividade inicial se transformando no Tório-234.

Cada radionuclídeo possui um tempo de meia-vida diferente e isso lhe confere características e utilidades específicas.

A atividade[1] de cada radionuclídeo possui como unidade quantitativa o Becquerel (Bq), que mede a quantidade de radioatividade presente sem considerar que tipo de radiação é emitida (1 Bq = 1 transformação nuclear ou decaimento por segundo).

Todos os Radionuclídeos podem ser identificados por suas características de desintegração nuclear, o que inclui a taxa de decaimento, o tempo de meia-vida e o tipo e energia da radiação emitida (HEALTH CANADÁ 2011).

Alguns dos radionuclídeos na sua série de decaimento emitem raios gama característicos, que são a emissão do excesso de energia. A medição desses raios gama podem ser feitos usando a técnica de espectrometria gama que nos permite determinar as atividades de cada série e identificar as concentrações específicas dos radionuclídeos que se decompõem, como por exemplo as concentrações de Rádio-226 e Rádio-228. Essa avaliação dos teores de radionuclídeos e a sua associação com seus respectivos tempo de meia-vida tem uma importante aplicação nas técnicas de datação amplamente utilizadas em ciências como Geologia, Geografia, Arqueologia.

---

1 Atividade é definida como o número de transformações nucleares de energia por unidade de tempo. É medido em decaimentos por segundo e expresso em bequerel (Bq) (UNEP 2016).

3| RADIOATIVIDADE NATURAL

A Radioatividade Natural é aquela advinda tanto do espaço sideral (raios cósmicos) quanto de materiais radioativos presentes na crosta e na atmosfera da Terra. A maior parte da exposição da população mundial à radiação provém das fontes naturais, estas fontes de radiação estão presentes em todo local do planeta e são distribuídas nos gases atmosféricos, nas águas de rios e oceanos, nos solos, em rochas, nos animais e nos vegetais, ou seja, não há lugar na Terra sem influência da radiação ionizante natural (SPACOV 2016).

Os isótopos Potássio-40 (^{40}K – abundância natural de 0,01%), Urânio-238 (^{238}U - abundância natural de 99,27%) e Tório-232 (^{232}Th - abundância natural de 100%) são os radionuclídeos primordiais e juntamente com os radionuclídeos produzidos pelos seus decaimentos, como o Rádio-226 (^{226}Ra) e o Radônio-222 (^{222}Rn), contribuem para a radioatividade natural da crosta terrestre, tendo estes emitido radiação até mesmo antes da Terra ganhar a forma que conhecemos hoje (VASCONCELOS 2010; TAUHATA *et al.* 2014).

A radiação atmosférica se origina dos raios cósmicos, que são partículas altamente energéticas, principalmente prótons, elétrons, nêutrons e radiação gama provenientes do espaço sideral. Alguns desses raios são liberados pelo sol durante as suas erupções. A quantidade de radiação aumenta com a altitude e latitude, por isso em uma viagem de avião por exemplo, as pessoas recebem maiores doses de radiação, e isso ocorre porque em altas altitudes existe menor massa de ar, o que diminui a blindagem. Os responsáveis pela radiação cósmica são os radionuclídeos cosmogênicos: Trítio (^{3}H), Berílio-7 (^{7}Be), Carbono-14 (^{14}C), Sódio-22 (^{22}Na) e Criptônio-85 (^{85}Kr), etc (UNEP, 2016; TAUHATA *et al.*, 2014).

A figura 4 evidencia a distribuição das fontes naturais de radiação em todo o mundo.

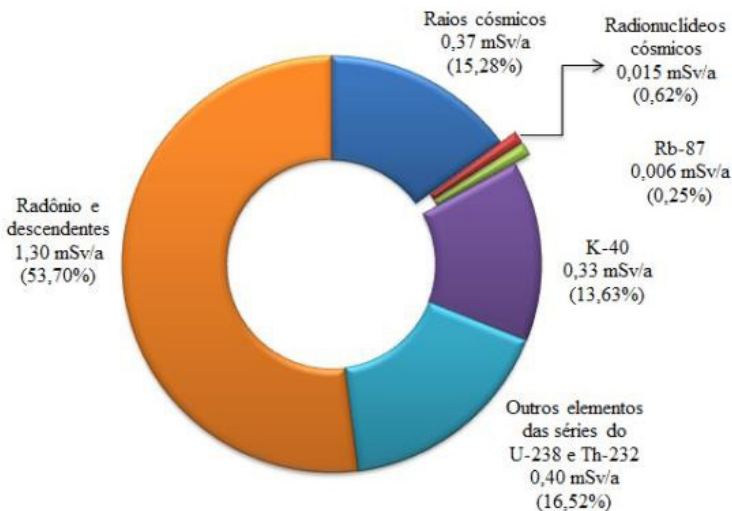



Figura 4 – Distribuição das fontes naturais de radioatividade
Fonte: SPACOV 2016, pg.16 *apud* UNSCEAR, 2000.

Alimentos e bebidas também podem ser fontes naturais de radioatividade, visto que certos radionuclídeos podem ser transferidos do solo e da água para plantas, e consequentemente para os animais. Peixes e crustáceos por exemplo, possuem níveis consideráveis de Chumbo- 210 (^{210}Pb) e de Polônio-210 (^{210}Po) (UNEP 2016).

As casas e construções são geralmente citados como fontes naturais de materiais radioativos devido à presença do Radônio-222, um radionuclídeo gasoso que provém do solo e das rochas e pode infiltrar-se diretamente nas edificações, através de cavidades e do piso, podendo se acumular (UNEP 2016).

O Radônio (Rn) é um radionuclídeo que emana do solo, mas suas concentrações no ambiente são muito baixas devido a dispersão, no entanto pode ser encontrado em concentrações de 2 a 20 vezes maior em ambientes internos e pouco ventilados. Geralmente em locais mais frios, onde as casas ficam muito fechadas e com aquecedores, as concentrações de Radônio são maiores. Pode ser encontrado como o radionuclídeo Radônio-222 ou Radônio-220, ambos na forma de gás e meia-vida curta (3,8 dias e 55 segundos respectivamente). O Radônio é responsável por cerca de metade da dose de radiação recebida por indivíduos (HASHIMOTO *et al*, 2016) e é altamente perigoso, pois se retido nos pulmões pode causar câncer (UNEP 2016).

Para o melhor entendimento da distribuição dos radionuclídeos naturais na terra, é relevante pensar no ciclo sedimentar e na mobilidade dos radionuclídeos onde a concentração destes é influenciada por suas diferentes solubilidades. O Urânio por exemplo, no seu estado oxidado, forma um íon solúvel, os minerais de Tório são pouco solúveis e mais facilmente carregados em suspensão, enquanto que os minerais de Rádio são altamente solúveis devido as suas características químicas (VASCONCELOS 2010).

CURIOSIDADE:

As areias das praias brasileiras de Guarapari – ES, Camburi – ES (Figura 5) e Cumuruxatiba – BA, entre outras, possuem altas doses de radiação devido a presença da Monazita e a Zirconita, minerais com altas concentrações de Urânio e Tório.

Figura 5 – Areia da Praia de Camburi, Vitória – ES

Fonte: MEL, 2020.

Conforme a UNSCEAR (Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos das Radiações Atômicas - 2000), a dose média mundial devido à radiação natural é de 2,4 mSv por ano, embora valores individuais possam ser consideravelmente mais altos. Os maiores responsáveis pela radioatividade natural terrestre são os NORM, descritos a seguir.

4l MATERIAIS RADIOATIVOS DE OCORRÊNCIA NATURAL – NORM

NORM é o acrônimo em inglês para *Naturally Occurring Radioactive Materials* ou, Materiais Radioativos de Ocorrência Natural, que como o próprio nome diz, são os elementos radioativos encontrados na natureza.

Os elementos de maior interesse neste contexto são o Urânio (U), Tório (Th) e Potássio (K), conhecidos naturalmente pelos seus isótopos radioativos, além de produtos das suas séries de decaimento como o Rádio e o Radônio.

Os NORM sempre estiverem presentes na crosta terrestre e também fazem parte da composição de todos os seres vivos estando presentes no nosso dia a dia, como no corpo humano, e nos alimentos (HEALTH CANADÁ 2011).

A concentração de NORM no ambiente é bem baixa, no entanto concentrações mais altas podem surgir em decorrência de ações humanas, neste caso dá-se o nome de TENORM, Materiais Radioativos de Ocorrência Natural Tecnologicamente Modificados (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials).* Estes decorrem do processamento ou manipulação do NORM em atividades industriais de modo que aumente a sua concentração no ambiente e consequentemente a exposição humana à radiação ionizante (LINCERADIO 2020). De uma forma geral, os dois termos são resumidos apenas pela sigla NORM, e o termo TENORM aparecerá apenas quando se fizer relevante no contexto. Os níveis de radiação apresentados pelos NORM são geralmente referenciados como um componente de “decaimento natural” tida como *background* (descrito no item 2.2).

Glossário de segurança da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2018) define NORM como:

"Material radioativo que não contém quantidades significativas de outros radionuclídeos
que não sejam os radionuclídeos que ocorrem naturalmente”

A distribuição de NORM no ambiente não é uniforme, e suas concentrações nas rochas e nos solos são em sua maioria dependentes da composição geoquímica do local e, consequentemente, a distribuição das doses de radiação natural diferem de um lugar para outro (ATIPO 2020). As rochas sofrem naturalmente processos de intemperismo, se transformando e decompondo em solos, sedimentos, sendo transportados para rios e lagos, e levando consigo seus radionuclídeos naturais chegando até a fauna e a flora.

Quando ocorre um aumento das concentrações de NORM no ambiente, esses nuclídeos devem estar sujeitos a alguma regulação específica, estipulada por órgãos de cada país ou região, para que se previna a contaminação e geração de problemas ao meio ambiente e aos humanos.

O órgão de maior responsabilidade e atuação na área nuclear é a Agência Internacional de Energia Atômica (*International Atomic Energy Agency* - IAEA), com sede em Viena, na Áustria. No Brasil, o órgão competente é a Comissão Nacional de Energia Nuclear, a CNEN.

Atualmente, a gestão de NORM e seus resíduos tem sido assunto de inúmeros estudos em desenvolvimento ao redor do mundo. Uma gestão efetiva na geração desses resíduos é de suma importância no contexto industrial por buscar o desenvolvimento de novas tecnologias que atuem no tratamento desses materiais e no setor de proteção radiológica aos trabalhadores.

As doses de NORM não podem ser evitadas por estarem presentes em todos os ambientes naturais, no entanto deve-se avaliar em que nível de dose é necessário começar a aplicar práticas de proteção contra a radiação proveniente de NORM, além de se estudar sobre as formas de liberação e prevenção desses materiais no ambiente externo.

4.1 NORM na indústria

As indústrias geradoras de NORM, são no geral, de considerável importância econômica. Seguem alguns exemplos e suas origens (HEALTH CANADÁ 2011):

- *Mineração:* liberação ou concentração de NORM durante o processamento do minério;
- *Produção de óleo e gás:* presença de NORM nas formações geológicas que contêm hidrocarbonetos;
- *Reciclagem de metais:* Os materiais contaminados por NORM podem ser redistribuídos para outras indústrias, resultando na formação de novos produtos contaminados;
- *Produtos florestais e produção termoelétrica:* as cinzas minerais deixadas pela combustão podem concentrar pequenas quantidades de NORM presentes naturalmente nos materiais vegetais e no carvão;
- *Instalações de tratamento de água*: pode liberar radônio;

- *Construção de túneis e obras subterrâneas:* possível presença de minerais radioativos no maciço geológico desses locais;

- *Extração e processamentos em:* indústrias de fertilizantes fosfatados, mineração de carvão, indústria de terras raras, dióxido de titânio, zircônio e cerâmica.

O tipo e a quantidade desses materiais radioativos liberados variam consideravelmente de um processo industrial para outro, assim como da sua localização geográfica (IAEA 2004).

Os NORM associados às atividades industriais podem existir em muitas formas - pode ser minério, matéria-prima de processo, produto intermediário, produto final, subproduto ou resíduo de processo, e pode estar na forma sólida, líquida ou gasosa.

Algumas dessas indústrias podem liberar NORM em quantidades suficientes para gerar doses elevadas de radiação aos trabalhadores, o que requer a aplicação de práticas de Proteção Radiológica afim de reduzir essas doses e consequentemente reduzir o risco associado (HEALTH CANADÁ 2011).

No Brasil, as principais empresas preocupadas com os riscos do NORM são aquelas ligadas aos setores de carvão, óleo e gás, além das empresas de extração e processamento de minérios, como por exemplo, mineração de fosfato, nióbio e estanho (LINCERADIO, 2020).

Nas indústrias de mineração e processamento mineral, o comportamento dos NORM está relacionado com o fato de que os radionuclídeos podem ser mobilizados, pois pode ocorrer perturbação das condições de equilíbrio que existiam no minério, e pela possibilidade de concentrações de atividades[1] muito maiores em certos processos materiais (HARIDASAN 2013).

Na produção de óleo e gás os NORM tendem a estar presentes nas águas de exploração e produção do processo.

Dentro dessas indústrias é importante se ter um conhecimento acerca dos possíveis impactos da radiação aos trabalhadores e ao ambiente, por isso estas devem seguir as regulações estaduais e/ou federais de forma efetiva afim de minimizar o contato desses materiais com a sociedade.

4.2 NORM na exploração e produção de óleo e gás

Em depósitos de gás e petróleo, os NORM estão presentes em concentrações naturais, inseridas nas rochas e formações geológicas da região onde ocorrerá a exploração.

Na indústria de óleo e gás, são observados dois principais tipos de resíduos de NORM: os denominados lodos ou lamas, e as incrustações, sendo que ambos contêm os radionuclídeos ^{226}Ra e ^{228}Ra como majoritários (GODOY 2020). Estes radioisótopos de Rádio, assim como o ^{224}Ra e ^{210}Pb aparecem também na água de produção, ou seja, água associada ao processo que durante a extração, consegue carrear estes radionuclídeos pelo poço.

No processamento de petróleo bruto em uma refinaria, mais de 1000 toneladas de resíduos contendo radionuclídeos de origem natural podem ser gerados em um ano. O uso ou eliminação desses resíduos estão sujeitos aos limites de concentração de atividade

(IAEA, 2016).

As incrustações são formadas por precipitação e deposição nas paredes internas dos tubos de perfuração dos poços e dos equipamentos (bombas, válvulas, separadores, etc.). Nestes itens passa um fluxo de líquidos bastante pesado que exerce uma grande força na parede da tubulação, o que vai gerando localmente uma acumulação e subsequente sedimentação de resíduos. Com o passar do tempo essa sedimentação se transforma numa incrustação propriamente dita, potencializada pela precipitação de sulfato de bário, por exemplo, que é um sólido pouco solúvel em água. A Figura 6 exemplifica uma incrustação em uma tubulação na indústria de óleo e gás.

(a) (b)

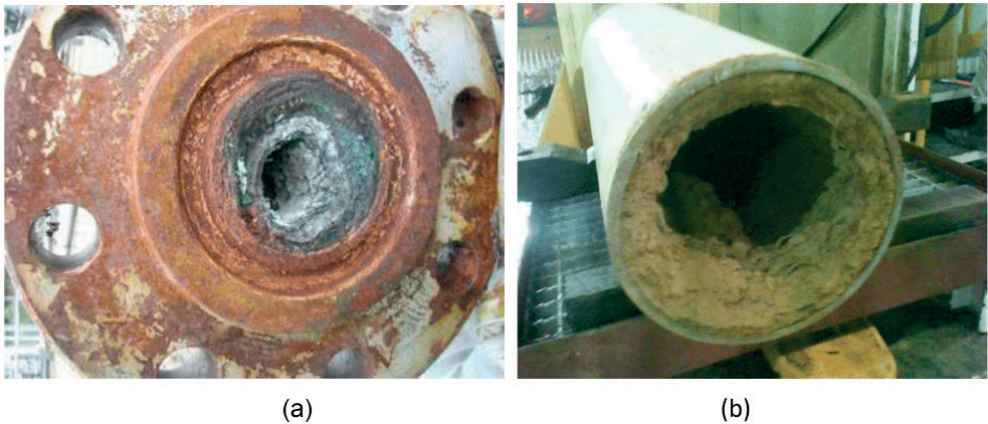



Figura 6 – Exemplos de acumulação de NORM nas paredes de um tubo

Fonte: (a) IOGP, 2016. pg.19; (b) HARIDASAN, 2013.

No exemplo específico da figura 6 (a), descrito pela IOGP (2016), foi obtida uma dose de 8 µSv/h no exterior do tubo em processos de uma empresa exploratória americana de petróleo e gás.

As lamas, ou também nomeadas de borras oleosas são misturas de óleo, sedimentos e resíduos inorgânicos que se acumulam nos tanques de separação, no fundo de tanques de armazenagem e outros equipamentos, e o volume desse resíduo formado é bem maior que as incrustações. Esta lama é retirada destes equipamentos e armazenada em tambores (GODOY 2020).

A formação de incrustações nos tubos irá depender do perfil geológico da bacia explorada, do insumo que é usado no ato de produção do petróleo, e do formato das tubulações. Se o equipamento é reto ou faz curva, deve-se levar em conta a mecânica dos fluidos envolvida no processo. No caso das incrustações, uma passagem de resíduos líquidos nos tubos por muito tempo pode causar uma impregnação desse material, podendo ocasionar em obstrução da secção de fluxo da tubulação; isso faz com que haja um prejuízo econômico pois irá passar pouco ou nenhum petróleo neste tubo, reduzindo o volume produzido, então faz-se necessário que em determinado momento do processo, esse tubo seja substituído. No entanto, o tubo que será substituído tem certa radioatividade, então

para que se possa descartá-lo é necessário limpá-lo. No processo de limpeza, a sucata fica isenta da radioatividade, gerando dois tipos separados de resíduos: a sucata metálica e os rejeitos radioativos que são a incrustação. Se o tubo tem um nível de radioatividade muito baixo, menor do que 1,0 Bq/g ele pode ser dispensado, mas não como lixo urbano, pois é preciso seguir a legislação ambiental, ou seja, ele deve passar por tratamento na qualidade de sucata. Com as borras ocorre o mesmo processo (VALINHAS 2020).

Em algumas situações, faz-se uso da água do mar para exploração e recuperação de hidrocarbonetos em reservatórios. E devido a água do mar ser mais salina, a mesma pode dificultar a dissolução de sais radioativos advindos dos minerais presentes nas formações geológicas do poço de exploração (LINCERADIO 2020).

Pesquisas anteriores identificaram presença dos radionuclídeos ^{226}Ra, ^{228}Ra e gás radônio ^{222}Rn em resíduos de gás natural provenientes da perfuração de petróleo e gás. O ^{226}Ra e o ^{228}Ra foram os principais radionuclídeos associados à extração de gás natural, e possuem meia vida de 1600 e 5,8 anos respectivamente. Esses radionulíceos têm sido identificados como abundantes em águas salinas, o que pode acabar se tornando um problema (RICH 2013).

Resíduos advindos de poços de exploração que são despejados em aterros e tanques acabam por causar preocupação com o meio ambiente pela possível contaminação e exposição humana a radioisótopos nocivos, frequentemente presentes na lama de perfuração dos poços, uma vez que estas instalações não têm capacidade de testar ou remover material radioativo do fluxo de resíduos. Além disso, a possibilidade de percolação desses fluidos de resíduos pode aumentar o potencial para contaminação da água potável por migração de radionuclídeos para corpos de água subterrânea (RICH 2013).

Na indústria de petróleo e gás, as concentrações de ^{226}Ra podem atingir ou exceder 15000 Bq/g em incrustações dentro de tubos e válvulas diferentes, e 800 Bq/g em lamas. As incrustações são removidas em estações especiais de tratamento de NORM e são tipicamente compactadas em tambores que são mantidos em uma área controlada e depois descartada em instalações autorizadas (TSURIKOV 2016).

Uma pesquisa da Associação de Estados e Funcionários de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Territoriais (*Association of State and Territorial Solid Waste Management Officials* – ASTSWMO) constatou que quase todos os estados americanos usam um valor anual de 1 mSv para limites de exposição à NORM advindas da indústria de óleo e gás. Em relação à concentração de rádio, alguns estados produtores de petróleo e gás estabeleceram um limite de concentração de 0,185 Bq/g em superfície de solo chegando até 1,11 Bq/g em alguns casos (EGIDI 2016).

O relatório de segurança nº34 da IAEA intitulado “Proteção da Radiação e Gestão de Resíduos Radioativos na Indústria de Óleo e Gás”, relata que ao longo dos anos uma grande quantidade de dados tem sido recolhida sobre as concentrações de radionuclídeos NORM nas indústrias de óleo e gás apesar de poucos terem sido publicados. A tabela 1 descreve as concentrações dos principais radionuclídeos encontrados em produtos da indústria de óleo e gás.

Radionuclídeo	Água de produção Bq/L	Inscrustações Bq/g	Lodos Bq/g
U-238	0,0003 – 0,1	0,001 – 0,5	0,005 – 0,01
Ra-226	0,002 – 1200	0,1 – 15000	0,05 - 800
Po-210	-	0,02 – 1,5	0,004 - 160
Pb-210	0,05 – 190	0,02 – 75	0,1 - 1300
Th-232	0,0003 – 0,001	0,001 – 0,002	0,002 – 0,01
Ra-228	0,3 – 180	0,05 – 2800	0,5 - 50
Ra-224	0,5 - 40	-	-

Tabela 1 – Concentração de NORM em alguns produtos da indústria de óleo e gás.

Fonte: IAEA 2003, pg.56.

Ao analisar a Tabela 1 percebe-se que as concentrações de Ra-226, Ra-228 em inscrustações e lodos variam entre 0,05 Bq/g até 15.000 Bq/g. Geralmente, as concentrações de atividade dos isótopos de rádio são mais baixas nos lodos do que nas incrustações. O oposto aplica-se a Pb-210, que normalmente tem uma concentração relativamente baixa em incrustações mas que pode atingir uma concentração superior a 1000 Bq/g em lodos (IAEA 2003). Além disso, na tabela 1, o isótopo com maior faixa de concentração é o ^{226}Ra nos três locais observados, sendo que apenas nos lodos o ^{210}Pb pode alcançar um valor maior em concentração.

A primeira identificação de NORM na indústria de óleo e gás no Brasil ocorreu em 1988, mas foi considerada relevante apenas após 1990, sendo tratado inicialmente como uma questão de proteção ao trabalhador. A identificação ocorreu no momento que algumas tubulações estavam sendo conduzidas como resíduo para uma área de processamento de sucata. Percebeu-se que aquele material tinha um certo nível de radioatividade, apesar de baixo. Inicialmente, sem nenhuma norma de regulação, eram aceitáveis níveis de até 500 Bq/g de atividade nesses locais. Nos anos seguintes, o crescimento regulatório tanto ambiental como da parte de radioproteção acompanhou o crescimento industrial, e em 2005 a CNEN, pela norma 3.01/2005, percebeu que existia uma necessidade do controle desses materiais. Anteriormente, como não havia limite estipulado, todo o material que era gerado como lama ou como resíduo, não se encaixava em uma regulação de rejeito radioativo, e era simplesmente classificado como resíduo perigoso (VALINHAS 2019).

A partir da regulação começou a se estabelecer valores, inicialmente com 100 Bq/g em relação à atividade dos radionuclídeos das lamas, também chamadas borras oleosas e das incrustações provenientes dos tubos. Em 2005 o valor passou de 100 para 10 Bq/g; então tudo que ficasse acima de 10 Bq/g era considerado material radioativo e tudo que era abaixo poderia ser dispensado como um rejeito apenas perigoso. Em 2014 esse limite baixou para 1,0 Bq/g pela norma CNEN 8.01/2014. No entanto, como esse limite baixou muito, o volume de material gerado e classificado como rejeito radioativo aumentou consideravelmente. Os resíduos com atividade acima de 1,0 Bq/g estão sendo

armazenados em uma instalação temporária controlada, enquanto aguardam uma decisão da CNEN sobre o repositório definitivo (VALINHAS 2019).

Toda a questão em torno da geração desses resíduos acaba impulsionando um outro problema: a gestão desses resíduos. Levando em conta a meia vida dos principais radionuclídeos, de 1600 anos por exemplo (^{226}Ra), é quase impossível e inviável criar projetos e tecnologias que garantam 1600 anos de tratamento e armazenamento para resíduos como a borra oleosa ou incrustações, visto que são apenas resíduos e não possuem valor agregado como os rejeitos de urânio por exemplo, que geram energia em uma usina nuclear. Cria-se, portanto, um problema não apenas no Brasil, mas em todo o mundo: Não se tem onde destinar o resíduo radioativo, mas é preciso armazená- lo.

Nos Estados Unidos, para resíduos acima de 1,0 Bq/g existem depósitos ou tecnologias de reinjeção em poços que permitem a dispensa para lamas acima de 1,0 até 500 Bq/g. No Brasil existem borras com em média 50 Bq/g, um valor muito alto, mas que infelizmente ainda não têm uma disposição final adequada, pela carência em tecnologia para esse tipo de rejeito (VALINHAS 2020).

Como no Brasil não existe uma empresa licenciada para realizar a deposição final de NORM gerada pelas indústrias de óleo e gás, em 2019 uma empresa brasileira desenvolveu um planejamento para exportar os NORM do Brasil para serem tratados nos Estados Unidos, país com normas específicas para esse processamento. Trata-se de uma alternativa relativamente cara mas que evitaria o longo processo de licenciamento necessário no Brasil, e portanto tem sido uma alternativa considerável, visto que no Brasil a única opção atual é a construção de depósitos em terra para esses resíduos. Portanto, o grande desafio do Brasil hoje nesse setor é sobre a deposição, tratamento e gestão dos resíduos de NORM gerados na indústria de óleo e gás. Esse problema se torna gigante à medida que o Brasil passa a ser cada dia mais, um grande produtor de petróleo a nível mundial (VALINHAS 2020).

A figura 7 (pg.20) exemplifica os principais isótopos liberados na exploração de óleo e gás, e seus principais locais de origem e acumulação, como água de produção e paredes internas dos tubos e equipamentos.

Percebe-se por meio da figura 7 (pg.20) a mobilidade dos isótopos de rádio através das tubulações e suas acumulações nas diferentes fases, o que ocorre principalmente devido às suas características químicas.

O ^{238}U e o ^{232}Th, isótopos pais, presentes nas rochas reservatórios de petróleo são praticamente insolúveis e são pouco carreados pelo petróleo e pela água de produção, que são bombeados em conjuntos para a superfície. No entanto, os seus filhos, o ^{226}Ra e ^{228}Ra são mais solúveis e sob certas condições físicas e químicas são carreados da rocha reservatório para a superfície.

O rádio pode permanecer na solução da água produzida ou coprecipitado com o bário na forma de complexos de sulfatos, carbonatos e silicatos encontrados nas incrustações e nas borras. A formação destes precipitados insolúveis é causada pelas mudanças de pressão e de temperatura conforme a água e o petróleo são bombeados para a superfície. Assim, existem duas formas de deposição destes rejeitos: tubulações com incrustações e tambores contendo borra oleosa.

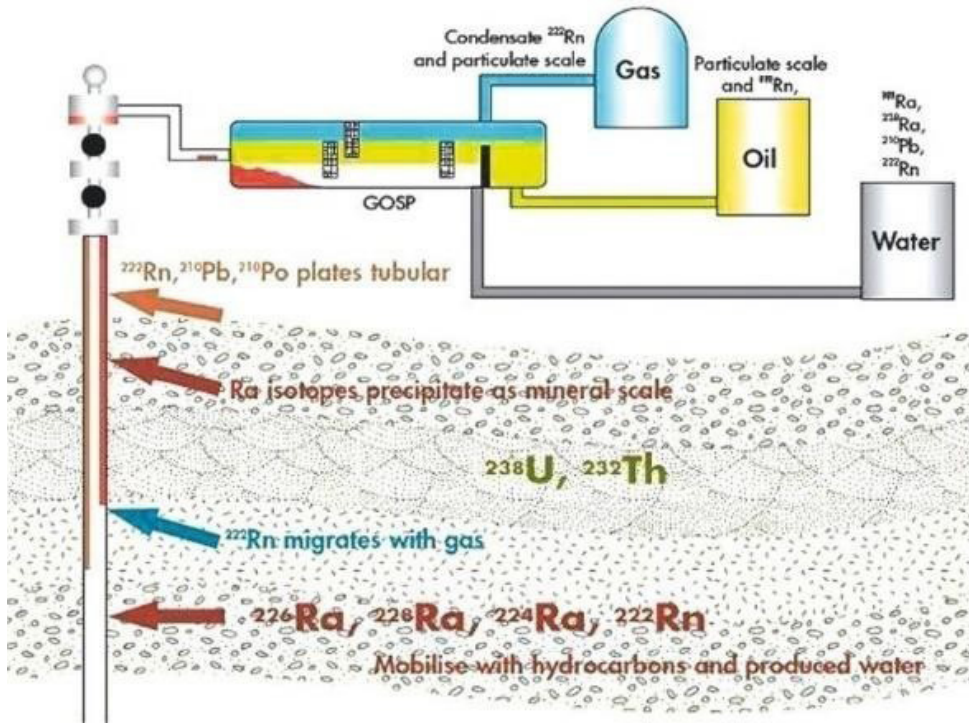



Figura 7 - Origens e rotas de transporte dos NORM's na exploração de petróleo e gás

Fonte: ROBLES, 2017.

4.3 NORM na exploração e produção de óleo e gás não convencional

A exploração de recursos não convencionais tem sido bastante discutida nos últimos anos. O grande aumento na produção de gás natural dos Estados Unidos por métodos não convencionais chamou a atenção mundial e trouxe à tona questões sociopolíticas e principalmente ambientais.

A explotação[1] de petróleo e gás natural por métodos não convencionais já vem sendo utilizado desde 1940 e já auxiliou países como Argentina e Estados Unidos a alavancar a produção de gás natural e com isso disparar o crescimento energético.

O fraturamento hidráulico, ou *fracking* é a técnica utilizada na exploração não convencional e se trata da inserção à alta pressão de um fluido composto por água, areia e aditivos químicos que irá causar a fratura de rochas de baixíssima permeabilidade. Com o fraturamento induzido das rochas pode ocorrer a liberação junto com o óleo e/ou gás de alguns radionuclídeos, os chamados NORM, e além dos aditivos químicos presentes no fluido de fraturamento, pode ocorrer frações de rocha s e solo que contenham NORM (DUARTE 2020).

Esses radionuclídeos podem então ser carreados através do poço de perfuração até à superfície junto com o *flowback water*, ou água de retorno (as que retornam à superfície

1 Ação de explotar, de tirar proveito financeiro de uma terra ou área, buscando seus recursos naturais.

logo após a despressurização subsequente ao *fracking*), sendo este um dos impactos mais discutidos associados ao uso do *fracking.*

O *fracking* é visto hoje, principalmente por ambientalistas, como um grande malefício ao meio ambiente, pela possibilidade de causar problemas como a contaminação de corpos d'água, ocupação de área natural, emissão de gases de efeito estufa como o metano e dióxido de carbono advindos do processo de exploração e da grande quantidade de caminhões que transportam os produtos, o enorme volume de água necessário para o processo, e certas substâncias químicas utilizadas no fluido vistas como cancerígenas. Encontram-se disponíveis na internet inúmeros vídeos explicativos da técnica, assim como documentários em sua maioria contrários ao uso do *fracking*. Algumas mídias retratam locais dos Estados Unidos onde houve casos de pessoas doentes após a instalação de poços de exploração não convencionais na região.

Os contrários à técnica são em sua maioria ambientalistas e entidades sociais, já os favoráveis são empreendedores e entidades que se interessam em fortalecer a prática e exploração de óleo e gás pelo mundo (FERREIRA *et al*, 2021). Apesar de ser um processo já firmado em alguns países, o mesmo ainda gera divergências ao redor do mundo. Os principais vídeos descritivos da técnica, seus benefícios e malefícios podem ser vistos no canal do Youtube da rede GASBRAS *"Rede GASBRAS de P&D para gás não convencional*".

Nos últimos anos tem aumentado consideravelmente o interesse nos NORM gerados pelas operações *onshore* (em terra) de petróleo e gás, em particular na exploração não convencional com uso do *fracking*. Na explotação não convencional, o consumo de água é consideravelmente maior, as rochas geradoras de reservatórios, como os folhelhos possuem naturalmente maiores concentrações de Urânio e Tório, e as águas de retorno podem ter níveis muito altos de salinidade e isso é frequentemente correlacionado com níveis elevados de NORM (IOGP 2016).

Estudos desenvolvidos em reservatórios não convencionais da Pensilvânia (EUA) mostraram um baixo potencial de exposição à radiação para os trabalhadores e o público desde o início, passando pelo processamento, e até a destinação final do gás natural nestes campos de explotação, desde que hajam controles adequados para administrar fluidos em caso de derramamento (IOGP 2016).

No Brasil ainda não ocorre exploração de óleo e gás por métodos não convencionais, ainda estão sendo feitos estudos em bacias sedimentares brasileiras acerca dos seus potenciais geradores, sendo o projeto GASBRAS o pioneiro nesses estudos em solo brasileiro. Para que possa firmar ou não esse tipo de processo no Brasil, são necessárias ainda muitas pesquisas e uma legislação efetiva que leve em conta aspectos socioambientais e técnicos.

Em relação à formação e liberação de NORM, além dos locais já existentes com geração de radioatividade pelo método convencional e mais usual, a exploração não convencional ainda é capaz de liberar radionuclídeos internos às rochas geradoras profundas do poço, ou seja, ainda existem impactos, bem como benefícios desse processo que precisam ser estudados e trabalhados, além do longo processo de regulação política e ambiental, só assim poderá se falar com mais confiança na inserção dessa técnica de explotação de óleo e gás natural no Brasil.

4.4 Impactos ambientais e na saúde atrelados aos NORM

Existem diversas rotas de exposição aos materiais radioativos de ocorrência natural em decorrência das inúmeras atividades industriais já citadas, além da exposição natural. Na indústria de óleo e gás por exemplo, ao serem carreados à superfície pela água de retorno esses NORM podem estar em contato com os trabalhadores do processo, assim como os tubos onde se formam as incrustações, e as demais tubulações da perfuração do poço.

As exposições potenciais diretas aos seres humanos, sejam elas ocupacionais ou residenciais, incluem a contaminação de águas subterrâneas, contaminação do solo, partículas e material aerosolizado, e emissões atmosféricas vindas de processos industriais. Existe também a exposição através do consumo de produtos agrícolas que podem conter estes radionuclídeos (RICH 2013). Esta é uma área de estudo que requer, portanto muita atenção e constante investigação.

Os efeitos do NORM sobre a saúde dependem basicamente da energia transmitida ao corpo, se ocorre na forma de radiação alfa, beta ou gama, que dissipa o excesso de energia em células vivas, o que pode resultar em danos celulares e mutação genética (IOGP 2016).

As exposições ao NORM se enquadram na categoria de situações de exposição existentes, ou seja, a fonte já existe, não é deliberadamente introduzida em um processo industrial por suas propriedades radioativas, ou as exposições geradas são acidentais, e algum controle proporcional ao risco é necessário (IAEA 2016).

Os NORM que apresentam maior preocupação no ambiente humano devido aos potenciais impactos na saúde são os isótopos de Rádio, Tório, e Urânio e seus produtos de decaimento como citados anteriormente (RICH 2013).

Os radionuclídeos presentes em solos, ar e alimentos podem chegar ao corpo humano por diferentes vias, o que acaba por aumentar a magnitude da dose de radiação absorvida. Essa contaminação com material radioativo pode ocorrer por ingestão, inalação, absorção pela pele, exposição e incorporação interna.

A medição e controle da dose efetiva, ou seja, as doses de radiação em humanos medidas em Sievert (Sv), é importante na proteção contra radiação, pois aplica-se a todos os tipos de exposição (raios X, alfa, beta, gama, eletróns, etc.) (IOGP 2016).

As medidas necessárias devem garantir, na medida do possível, que as exposições à radiação provenientes dos materiais contaminados, aos trabalhadores, não ultrapassem os limites estabelecidos pela CNEN enquanto todo o rejeito é removido do local, ou do equipamento.

A norma da CNEN NN 3.01 que tem como objetivo, estabelecer os requisitos básicos de proteção radiológica das pessoas em relação à exposição à radiação ionizante, prevê um valor de Dose efetiva de 20 mSv (ou uma média dos últimos 5 anos) para indivíduos ocupacionalmente expostos, ou seja, trabalhadores em áreas com radiação, e 1 mSv para público no geral (BRASIL 2014[a]).

Já a norma CNEN NN 8.01 de 2014 sobre “Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação” descreve que, para os rejeitos de extração e exploração

de petróleo, contendo radionuclídeos das séries do Urânio e Tório, considera-se o limite de $1x10^1$ kBq/kg para o ^{210}Pb, ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{232}Th e ^{238}U, para dispensa de materiais (Quantidade ≤1000 kg) (BRASIL, 2014[b]).

Os impactos dos resíduos de NORM dependem das instalações das fábricas e muito do tipo de resíduo (sólido, líquido ou gasoso). De uma forma geral o impacto causado pelos resíduos líquidos ou gasosos acaba sendo mais sério se comparado com os resíduos sólidos pois são mais facilmente descarregados e dispersados no ambiente. Os impactos dos resíduos sólidos tendem a ser mais limitados, especialmente quando se considera que a maioria das instalações que liberam NORM estão localizados em ambientes já industrializados (DA SILVA, *et al.* 2016).

A indústria mais relevante na geração de resíduos líquidos de NORM é a de exploração de petróleo bruto e gás natural, incluindo também a exploração mais recente de *shale gas* (reservas não convencionais), através da geração de grandes quantidades de água rica em rádio (água de processo ou água produzida) que pode ser liberada no meio ambiente, especialmente no ambiente marinho, no caso de plataformas *offshore* (MICHALIK 2016).

Quando se fala em impactos ambientais, estes estão associados aos impactos específicos de cada processo industrial. Impactos inerentes à mineração, carvoaria, e aquelas da exploração de óleo e gás existentes desde sempre, no qual o desenvolvimento técnico e científico ambiental vem buscando minimizar.

Em se tratando da indústria de óleo e gás, um desafio é a água de produção que contém radionuclídeos. Na exploração convencional de óleo e gás a água injetada é para expelir o óleo para fora do reservatório, já na explotação não convencional, o grande volume de água é usado basicamente para fraturar e facilitar o escoamento do gás. Assim, ambos os processos produzem água de retorno (*flowback water*), no entanto a explotação não convencional tende a gerar mais NORM porque é mais disruptiva no ambiente subterrâneo, e apesar de ser em baixas concentrações, o grande volume dessa água gerado e o seu potencial acumulativo exige atenção (IOGP 2016).

São impactos comuns à exploração convencional e não convencional de óleo e gás (Adaptado de AFWE, 2015):

- A presença de falhas na estrutura do poço, pode resulta em poluentes liberados do poço para as águas subterrâneas;
- Risco de inundação devido à localização das instalações em áreas de risco;
- Emissões para a atmosfera provenientes da construção e perfuração de poços, resultando em impactos locais na qualidade do ar;
- Emissões de gases de efeito estufa (GEE) durante a construção e perfuração de poços;
- Emissões de GEE devido a combustão dos hidrocarbonetos extraídos;
- Emissões atmosféricas, poeira e ruído associados às atividades de construção

e perfuração, resultando em impactos adversos nos receptores próximos;

- Riscos associados à saúde e segurança dos trabalhadores no local;
- Perda direta ou danos às características e paisagens do patrimônio cultural devido a construção do poço e da infraestrutura associada;
- Impactos na paisagem e impactos visuais devido as atividades operacionais.

Mas quando se fala em NORM, os impactos atrelados a esses materiais ganham destaque na exploração não convencional de óleo e gás, são eles:

- Geração de água de retorno (*flowback water*) com concentração de substâncias tóxicas, após atividades de *fracking*, onde se inclui os NORM*;*
- Contaminação dos mananciais de água potável devido às atividades de *fracking*: substâncias químicas do fluído de fraturamento, assim como presentes nas rochas: Radionuclídeos (NORM), metais tóxicos, entre outros.

Existe também a possibilidade da introdução de radionuclídeos na cadeia alimentar via peixes e frutos do mar, por múltiplas fontes, o que pode causar impactos potenciais à saúde humana (IOGP 2016). Esses possíveis caminhos são exemplificados na Figura 8, página 25.

Na Fig.8 as linhas tracejadas representam contaminação por exposição enquanto as setas contínuas indicam contaminação por ingestão, caminhos possíveis para que os NORM cheguem aos humanos.

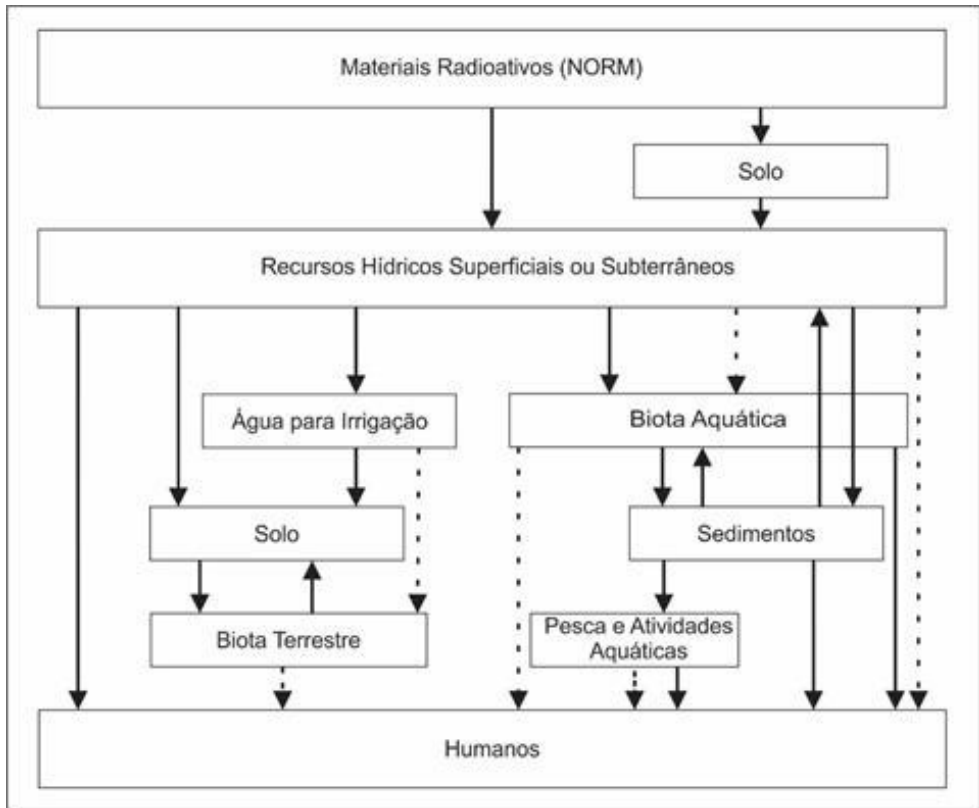



Figura 8- Caminhos possíveis para os radionuclídeos na natureza e possíveis riscos para a saúde humana

Fonte: adaptado de O'BRIEN & COOPER, 1998

Os fatores de recuperação de petróleo durante o desenvolvimento de reservatórios terciários podem aumentar ainda mais a quantidade total relativa de NORM descarregados. No entanto, o maior risco para o meio ambiente que isso potencialmente representa deve ser combinado com uma redução de outras probabilidades, como a redução da exposição a trabalhadores de campos petrolíferos, que acabam aumentando com a limpeza dos equipamentos contaminados por exemplo (IOGP 2016). Então a redução do risco ambiental deve ser ponderada com a elevação do risco para os trabalhadores caso os preceitos da proteção radiológica não sejam observados. Os impactos atrelados ao NORM devem, ser portanto, constantemente monitorados e estudados afim de serem desenvolvidos técnicas seguras de gerenciamento.

4.4.1 Radioproteção para NORM

A *Radioproteção* ou *Proteção Radiológica* pode ser definida como um conjunto de medidas que visam proteger o homem e o ecossistema de possíveis efeitos indesejáveis causados pelas radiações ionizantes (LINCERADIO 2020).

A concentração desses materiais radioativos no meio ambiente geralmente é muito

baixa, mas isso não quer dizer que não deva existir um sistema de proteção e práticas de trabalho em ambientes com presença de NORM, no Brasil a Norma NN 3.01 da CNEN é que dispõe sobre os limites de proteção de trabalhadores e comunidade.

As peças, equipamentos e qualquer material que contenha incrustações de NORM devem ser devidamente isoladas e identificadas, e direcionadas à área restrita de armazenamento ou tratamento (LINCERADIO 2020).

Existem atualmente em todo o mundo, instituições unicamente dedicadas à consultoria e serviços de radioproteção.

O monitoramento de NORM tem como principal objetivo identificar eventuais incrustações e resíduos de material radioativo nas linhas de produção de uma indústria. Seu risco está diretamente associado à presença e concentração do material radioativo, caso exista, em áreas de contato aos trabalhadores.

É necessário se atentar à aspectos importantes na busca por uma radioproteção efetiva:

- Observar as diferentes variedades de materiais contendo NORM: água de produção, incrustações, lodo, e resíduos de limpeza;

- Buscar opções de disposição para armazenamento dos resíduos, onde deve-se considerar o tipo de radionuclídeo, sua meia vida, energia e natureza do material radioativo; o risco radiológico do local durante o uso, a proteção adequada da saúde humana e do meio ambiente, a contaminação dos recursos naturais, viabilidade técnica, localização geográfica, custo,e aceitação pública (RAMOS, 2017).

Ao se tratar sobre a segurança na liberação de NORM ao ambiente, deve-se observar a intensidade da exposição aos trabalhadores e ao público em geral, a forma de proteção ao ambiente, o transporte de material radioativo, garantia da estabilidade dos sistemas de armazenamento a longo prazo, dos resíduos e opções de descarte e também a limitação das descargas de efluentes (HARIDASAN 2013).

Tratando-se da proteção de segurança radiológica em indústrias com geração de NORM, deve- se levar em conta os seguintes aspectos:

- A ventilação das áreas confinadas e subterrâneas de minas por exemplo;

- A possibilidade de derramamento e contaminação de resíduos e materiais radioativos;

- O potencial de contaminação nas plantas de processo;

- O uso adequado dos equipamentos de proteção individual;

- Proteção adequada contra radiações e suas particularidades de acordo com o tipo de indústria e processo (HARIDASAN 2013).

Existem dois caminhos por meio do qual os indivíduos podem ser expostos à radiação emitida por material radioativo, incluindo NORM: A irradiação por fontes externas

e por fontes internas, estas últimas devido à contaminação por fontes inaladas e ingeridas. A Figura 9, exemplifica esses caminhos.

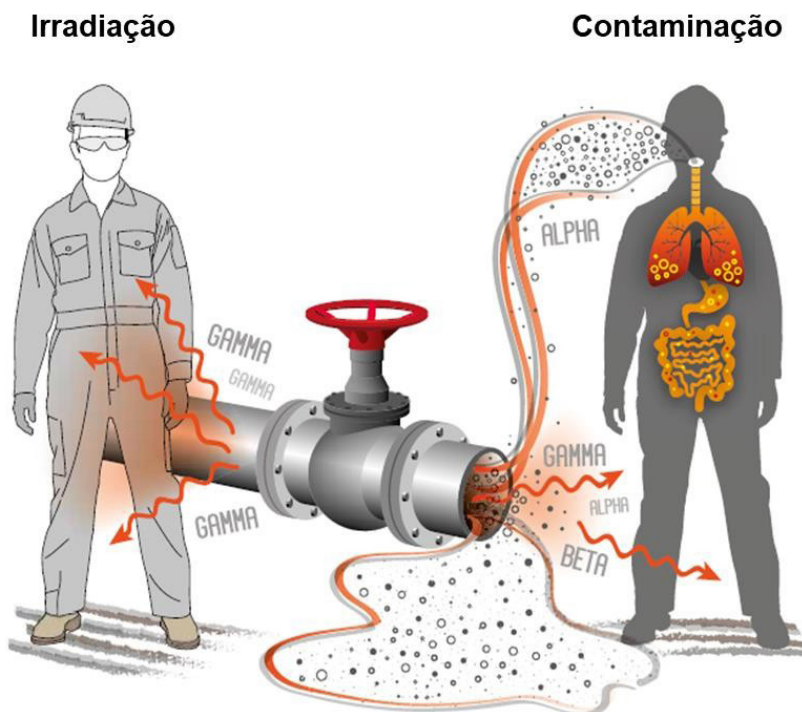



Figura 9 - Exposição à NORM a partir de fontes internas e externas

Fonte: Modificada de IOGP, 2016. pg.23.

A irradiação por fontes externas ocorre quando o material que emite radiação está localizado fora do corpo humano. Já as fontes internas são quando o material está localizado dentro do corpo humano. Esta última pode ocorrer por exemplo, quando há inalação ou ingestão de algum material contendo radionuclídeos (IOGP 2016).

Para fontes externas de NORM a poucos metros do equipamento ou material contaminado, a intensidade de contaminação será inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte, ou seja, a exposição na distância de um metro da fonte, será quatro vezes maior do que se a distância fosse de dois metros. No entanto, no ambiente natural, o NORM pode ser encontrado em uma área muito grande, portanto, isso tem relação direta com o tamanho da área controlada ao redor de um local contaminado por NORM (IOGP 2016).

4.5 Regulação

A regulamentação de NORM nos Estados Unidos da América é de certa forma complicada, pois ela obriga principalmente (mas não inteiramente) aos Estados individuais

de criarem suas regras quanto ao gerenciamento desses materiais. Enquanto esta abordagem proporciona flexibilidade, pode levar a inconsistências na regulamentação e abordagens diversas, particularmente no gerenciamento de resíduos de NORM (IAEA 2016). Seus regulamentos são também apoiados pela Comissão Internacional em Proteção Radiológica (*International Commission on Radiological Protection - ICRP*) que é um órgão internacional independente, responsável pelo desenvolvimento da ciência sobre a proteção radiológica, fornecendo recomendações e orientações sobre todos os aspectos da proteção contra a radiação ionizante. É uma organização sem fins lucrativos formada por membros de mais de 30 países, com sede em Ottawa, Canadá.

A principal agência federal americana responsável pela proteção do público e do meio ambiente da radioatividade natural é a Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency* - EPA). As normas de proteção contra radiação da EPA, que se refletem em regulamentações e orientações governamentais, são derivadas das leis federais que controlam exposição à radiação de membros do público e a disposição dos resíduos (EGIDI, 2016). No Canadá é a Comissão Canadense de Segurança Nuclear (*Canadian Nuclear Safety Commission* - CNSC) que tem a missão de regulamentar e fiscalizar o uso da energia nuclear e materiais associados com o objetivo de proteger a saúde dos trabalhadores e da população e o meio ambiente, assim como garantir o uso da energia nuclear apenas para fins pacíficos. Na Argentina é a Autoridade Regulatória Nuclear (*Autoridad Regulatoria Nuclear* - ARN) que tem como objetivo estabelecer, desenvolver e aplicar um regime regulador para todas as atividades nucleares que se realizem na República Argentina.

No geral, os resíduos contendo NORM nos EUA não são regulamentadas por agências federais e sim estaduais. Os resíduos de NORM gerados durante a exploração, desenvolvimento e produção de petróleo bruto, gás natural e energia geotérmica têm sido categorizados pela EPA como “resíduos especiais” e estão atualmente isentos dos regulamentos federais de resíduos perigosos e não são considerados um resíduo listado ou característico (RICH 2013).

A IAEA, órgão maior no setor nuclear, é o fórum intergovernamental central do mundo para a cooperação científica e técnica no campo nuclear. Ela trabalha para o uso seguro e pacífico da ciência e tecnologia nuclear, contribuindo para a paz e segurança internacionais e para as Metas de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, e conta com apoio de vários países, estando atuante desde 1957.

No Brasil a regulação acerca de materiais radioativos fica a cargo da CNEN. A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é uma instituição associada à IAEA, e possui 15 unidades distribuídas em 9 estados brasileiros, com sede no Rio de Janeiro. É uma autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), criada em 1956 e estruturada pela Lei 4.118, de 27 de agosto de 1962, para desenvolver a política nacional de energia nuclear. Órgão superior de planejamento, orientação, supervisão e fiscalização, a CNEN estabelece normas e regulamentos em radioproteção e é responsável por regular, licenciar e fiscalizar a produção e o uso da energia nuclear no Brasil (BRASIL 2020).

No Brasil não há uma legislação específica para o controle sobre o volume de rejeitos

gerados na formação de incrustações e borras com conteúdo radioativo em instalações de produção de petróleo e gás, apenas a norma CNEN NN 8.01 que trata sobre “Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação” de forma geral e cita o limite de $1x10^1$ kBq/kg para o ^{210}Pb, ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{232}Th e ^{238}U em rejeitos de extração e exploração de petróleo.

É importante que os rejeitos contendo radionuclídeos naturais sejam manipulados e armazenados de forma eficaz e regulamentada por normas nacionais coerentes com os princípios científicos consagrados, levando em consideração as tecnologias disponíveis, os custos operacionais e o impacto ambiental (DE JESUS 2005).

5| CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em consideração todos os conceitos retratados ao longo do caderno, pode-se perceber quão evidente é a importância econômica do petróleo e gás natural no setor energético mundial, assim como a presença inevitável da radioatividade natural no meio em que vivemos e em vários processos industriais, que ocorrem através da presença e da liberação dos NORM no meio ambiente.

Movimentos e pesquisas como estas desenvolvidas pelo Projeto GASBRAS tendem a esclarecer e facilitar a comunicação entre unidades de pesquisas, empresas exploratórias e produtoras e toda a sociedade, a fim de que o processo industrial de produção de energia por gás natural por exemplo, seja viabilizado na região em estudo com o menor impacto possível.

A falta de uma comunicação efetiva até mesmo dentro das empresas geradoras de NORM, acabam por causar um certo receio e até medo dos trabalhadores quando se fala em radioatividade, daí a importância de se discutir sobre o assunto esclarecendo sobre a forma como esta atua no nosso meio e no setor energético, assim como uma divulgação efetiva de informações técnico científicas.

É de senso comum dentro da comunidade científica que para desenvolver soluções e metodologias de prevenção e minimização de impactos ambientais deve-se conhecer a raiz do problema, portanto compreender conceitos técnicos sobre a química da radioatividade, suas relações com o setor de produção e exploração de óleo e gás são fundamentais na elaboração de processos gerenciais dos possíveis impactos.

É importante salientar que o gás natural é um recurso de extrema importância para a economia e toda a sociedade, possui inúmeras vantagens e portanto, deve ser explorado de forma consciente.

As explorações não convencionais tem crescido ao redor do mundo, e apesar de ainda não existirem no Brasil, já proporcionam um movimento no setor energético nacional. O uso de fontes não renováveis no setor elétrico brasileiro ainda é, e permanecerá forte por muito tempo, o que vem associado aos riscos e impactos atrelados a esse tipo de indústria. Portanto é de extrema importância desenvolver planos e tecnologias de monitoramento e controle de NORM, assim como a gestão efetiva e sustentável dos seus resíduos, e uma comunicação eficaz com toda a sociedade envolvida nos processos.

REFERÊNCIAS

AFWE - Amec Foster Wheeler Environment & Infrastructure (2015) Shale Gas Study. Final Report, Foreign and Commonwealth Office.United kingdon

ATIPO, M., OLARINOYE, O., AWOJOYOGBE. Comparative analysis of NORM concentration in mineral soils and tailings from a tin-mine in Nigeria. **Environmental Earth Sciences**. Alemanha, Agosto, 2020.

BRASIL. CNEN. **Comissão Nacional de Energia Nuclear - Quem somos**. 2020. Disponível em: http://antigo.cnen.gov.br/quem-somos. Acesso em: 28 dez. 2020.

BRASIL[a]. Comissão Nacional de Energia Nuclear, *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica Norma CNEN NN-3.01,* CNEN, Brasil, 2014.

BRASIL[b]. Comissão Nacional de Energia Nuclear. *Gerência De Rejeitos Radioativos De Baixo E Médio Níveis De Radiação***.** *Norma CNEN NN-8.01,* CNEN, Brasil, 2014.

DA SILVA, N.C., *et al*. Radionuclides Of Natural Origin In Stream Sediments Of The Poços De Caldas Plateau, Brazil. In: PROCEEDINGS OF AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM. 2016, Rio de Janeiro. **Proceedings Series: Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VIII).** Rio de Janeiro, Brazil: IAEA, 2018. p. 236-239.

DE JESUS, S. P., VITORELLI, J. C., SILVA, A. X. Aspectos normativos sobre ocorrência natural de material radioativo em rejeitos de petróleo. In: *International Nuclear Atlantic Conference – INAC. 2005.* Rio de Janeiro, Brasil.

DUARTE, J.C.M., MOREIRA, R.M., FILHO, C.A.C. Use Of 226Ra and 228Ra Radiometry In The Investigation Of Norm Formation Processes In Shale Gas. 2020 **In: International Conference on Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industry.** Online. Viena, Áustria. Oct.2020.

EGIDI, P.V. Updates To TENORM Management In The United States. In: PROCEEDINGS OF AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM. 2016, Rio de Janeiro. **Proceedings Series: Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VIII).** Rio de Janeiro, Brazil: IAEA, 2018. p. 27-34.

FERREIRA, V.G., LIMA, J.S.D., LIMA, G.F.C., DUARTE, J.C.M. Considerações Socioambientais sobre as Mídias No-Fracking e Pró-Fracking. **Recursos não convencionais- FGV Energia**. Rio de Janeiro, ano.8, nº12, p.17-43, fev/2021.

GODOY, J. M. Back and solutions for the NORM waste generated in oil and gas industry in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT OF NATURALLY OCCURING RADIOACTIVE MATERIAL (NORM) IN INDUSTRY 2020. 19-30 out.2020 Viena, Áustria: IAEA, 2020.

HASHIMOTO, Y.R., CORRÊA, J.N., PASCHUK, S.A., NARLOCH, D.C., MENDES, A.P., WOSNIACK, L.M., MACIOSKI, G. Radon Activity Concentrations In An Experimental Living Environment In Curitiba, Brazil. In: PROCEEDINGS OF AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM. 2016, Rio de Janeiro. **Proceedings Series: Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VIII).** Rio de Janeiro, Brazil: IAEA, 2018. p. 155-158.

HARIDASAN, P.P. An Overview of IAEA Industry Specific Safety Reports on NORM. In: INTERNATIONAL WORKING FORUM ON REGULATORY SUPERVISION OF LEGACY SITES (RSLS), 22 – 24 out. 2013.**Forum.** Viena**,** Áustria: IAEA, 2013. p. 1-25.

HEALTH CANADA - RADIATION PROTECTION BUREAU. **Canadian Guidelines for the Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM).** Prepared by the Canadian

NORM Working Group of the Federal Provincial Territorial Radiation Protection Committee. 2011. 70p.

IAEA. International Atomic Energy Agency. Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VIII). In: PROCEEDINGS OF AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 2016. Rio de Janeiro. **Proceedings Series.** Rio de Janeiro, Brazil: IAEA, 2018. p. 1-424.

IAEA. International Atomic Energy Agency – RADIATION, PEOPLE AND TEH ENVIRONMENT. Austria, February 2004.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **Safety Reports Series, Nº 34:** Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. Viena, Áustria: IAEA, 2003. 139 p.

IAEA Safety Glossary. Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2018 Edition. Viena, 2019.

IOGP – International Association of Oil & Gas Producers. **Managing Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the oil and gas industry**. Report.412. 2016.

L'ANNUNZIATA, M.F. Handbook of Radioactivity. Academic Press, 3º edição. Estados Unidos, 2012. Cap.1. pg.1418.

LINCERADIO. Lince Radioproteção. Guia completo de gestão NORM e TENORM. Brasil, 2020. Disponível em: http://linceradio.com.br/.

MEL, Kissila. **Areia preta em Camburi não vem do porto, dizem Vale e Iema**. 2020. Disponível em: https://www.al.es.gov.br/Noticia/2020/06/39392/areia-preta-em-camburi-nao-vem-do-porto-dizem-vale-e-iema.html. Acesso em: 1 fev. 2021.

MICHALIK, B.Residues From Norm Industries: A Unified Approach To Environmental Impact Assessment. In: PROCEEDINGS OF AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM. 2016, Rio de Janeiro. **Proceedings Series: Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VIII).** Rio de Janeiro, Brazil: IAEA, 2018. p. 248-255.

O'BRIEN, R. S.; COOPER, M. B. Technologically enhanced naturally occurring radioactive material (NORM): Pathway analysis and radiological impact. Applied Radiation and Isotopes, v. 49, n. 3, p. 227–239, 1998.

RAMOS, M. M. O. Experiencia de la CNEN/Brasil sobre NORM de la industria de gas y petróleo. División de Desechos Radioactivos. DIREJ/DRS/CNEN. Rio de Janeiro, 2017.

RICH, A. L., CROSBY, E. C. **Analysis Of Reserve Pit Sludge From Unconventional Natural Gas Hydraulic Fracturing And Drilling Operations For The Presence Of Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material (TENORM).** Texas, EUA: New Solutions, 2013. v. 23 (1), p.117-135.

ROBLES, M.B. Natural Occurring Radioactive Materials (NORM´s) in México. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Rio de Janeiro, junho, 2017.

SPACOV, I. C. G. Monitoração de Trabalhadores Expostos à Radiação Natural em Minas no Seridó do Nordeste Brasileiro. 2016. 80 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologias Energéticas e Nucleares, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pe, 2016.

TAUHATA, L., SALATI, I. P. A., DI PRINZIO, R., DI PRINZIO, M. A. R. R. **Radioproteção e Dosimetria:** Fundamentos - 10ª ed. Rio de Janeiro - IRD/CNEN. 2014. Cap.2. 344p.

TSURIKOV, N. MANAGEMENT OF NORM RESIDUES: PRACTICAL ASPECTS. In: PROCEEDINGS OF AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM. 2016, Rio de Janeiro. **Proceedings Series: Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VIII).** Rio de Janeiro, Brazil: IAEA, 2018. p. 78-90.

UNEP. United Nations Environment Programme. **Radiação: efeitos e fontes, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente**, 2016. Trad: Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Brasil).

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2000. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Vol. I: Sources, Annex B: Exposures from natural radiation sources, United Nations, New York (2000).

VALINHAS, M. Gerenciamento de resíduos e rejeitos na indústria de óleo e gás. Direção e realização: GASBRAS-MG. Brasil:2020. (44 min.), Painel Científico. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=1MYGHtLrBb0&ab_channel=RedeGasbr%C3%A1sdeP%26DparaG%C3%A1sN%C3%A3oConvencional. Acesso em: 02 ago. 2020.

VALINHAS, M. M. Waste Management of NORM Rejects and Hazardous Waste in Offshore Oil and Gas Production in Brazil (2002–2018). Event NORM IX. IAEA - Viena, Outubro, 2019. Disponível em: https://nucleus.iaea.org/sites/orpnet/home/Shared%20Documents/T2-Valinhas-NORM- Waste-Mangement-Brazil.pdf. Acesso em: 30 dez.2020

VASCONCELOS, D. C. **ESTUDO DA RADIOATIVIDADE NATURAL EM AREIAS DE PRAIAS DO EXTREMO SUL DA BAHIA UTILIZANDO MÉTODOS DE ANÁLISES NUCLEARES**. 2010. 124 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências e Técnicas Nucleares, Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SOBRE OS AUTORES

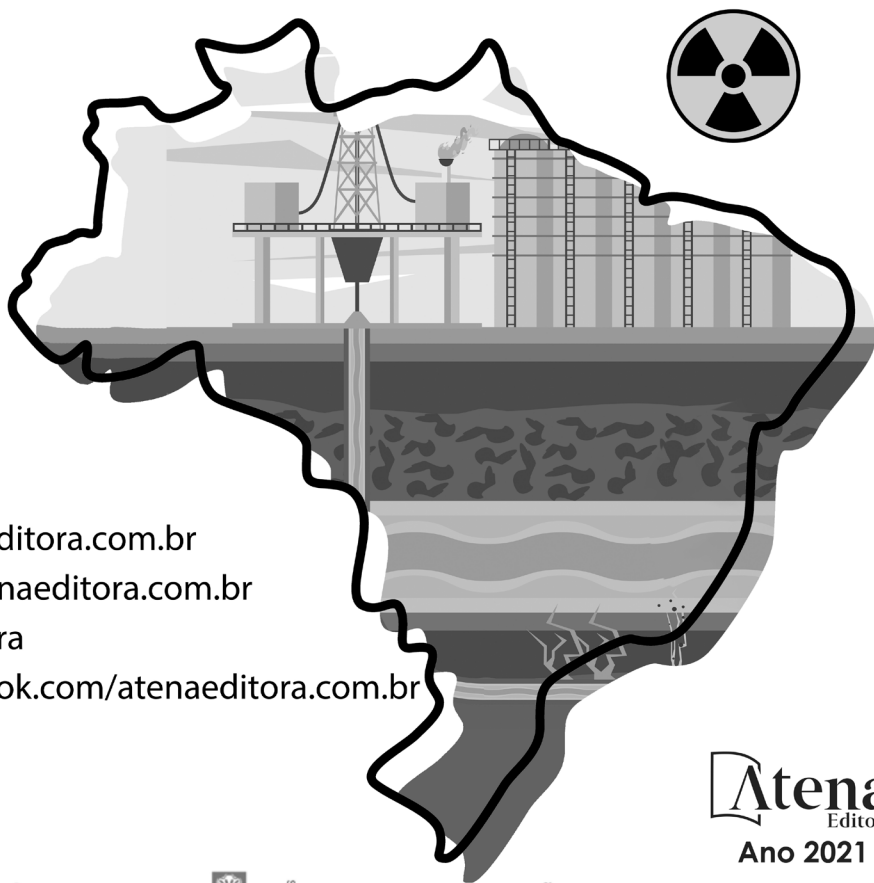
JOYCE CASTRO DE MENEZES DUARTE - Mestre em Ciência e Tecnologia das Radiações Minerais e Materiais pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e graduada em Química Tecnológica pelo CEFET-MG. Atuou como Pesquisadora Química junto ao Projeto GASBRAS de 2020 a 2021 colaborando com pesquisas no âmbito geológico, e de Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM). Bolsista de pesquisa CNPQ no Laboratório de Trítio Ambiental do CDTN de 2017 a 2019. Experiência com processos laboratoriais em amostras de água e rocha, análises instrumentais como GCMS e Espectrometria por Cintilação Líquida e vivência com Gestão da Qualidade ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017.

GUSTAVO FILEMON COSTA LIMA - Graduado em Geologia pela Universidade Federal de Minas Gerais (2016) com período sanduíche na University of South Wales (2014), Técnico em Mineração pela Escola Politécnica de Belo Horizonte (2018), mestre em Geologia Econômica e Aplicada pela Universidade Federal de Minas Gerais (2020) e Doutorando em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Possui experiência nas áreas de Geologia e Geoquímica Ambiental, técnicas laboratoriais aplicadas a amostras geológicas, Mapeamento Geológico, Geoprocessamento, Hidrologia, Hidrogeologia e Hidrocarbonetos não convencionais. Atualmente trabalha como Coordenador de Laboratórios do Departamento de Engenharia de Transportes no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG).

VINÍCIUS GONÇALVES FERREIRA - Possui graduação em Geologia pela Universidade Federal de Minas Gerais (2014), Mestre em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais com ênfase em Tecnologia Mineral e Meio Ambiente pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). Ampla experiência em análises hidroquímicas e isotópicas, incluindo datações, sobre amostras de águas e gases. Experiência em processos viáveis de meios adsortivos e de flotação para o tratamento de efluentes líquidos gerados na produção do grafeno em planta piloto. Atua na área de geologia ambiental com foco em recursos hídricos (avaliação e monitoramento hidrogeológico, hidroquimico e isotópico). Realiza trabalhos de mapeamentos geológicos e hidrogeológicos. Atuar em trabalhos voltados a consultorias em geologia ambiental, hidrogeoquimica e responsabilidades técnicas associadas.

JUSSARA DA SILVA DINIZ LIMA - Possui graduação em Engenharia Ambiental pelo Centro Universitário Newton Paiva (2019) e Técnica de Mineração pela Escola Técnica de Formação Profissional - META (2011). Atuou como Engenheira Ambiental no Projeto Gasbras constituído por uma rede P&D a nível nacional, amparado financeiramente pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projeto), projeto gerenciado financeira e administrada pela FUSP (Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo). As atividades realizadas no INCT Acqua/Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Radioatividade Natural na Exploração e Produção de Óleo e Gás Não Convencional

Radioatividade Natural na Exploração e Produção de Óleo e Gás Não Convencional

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br